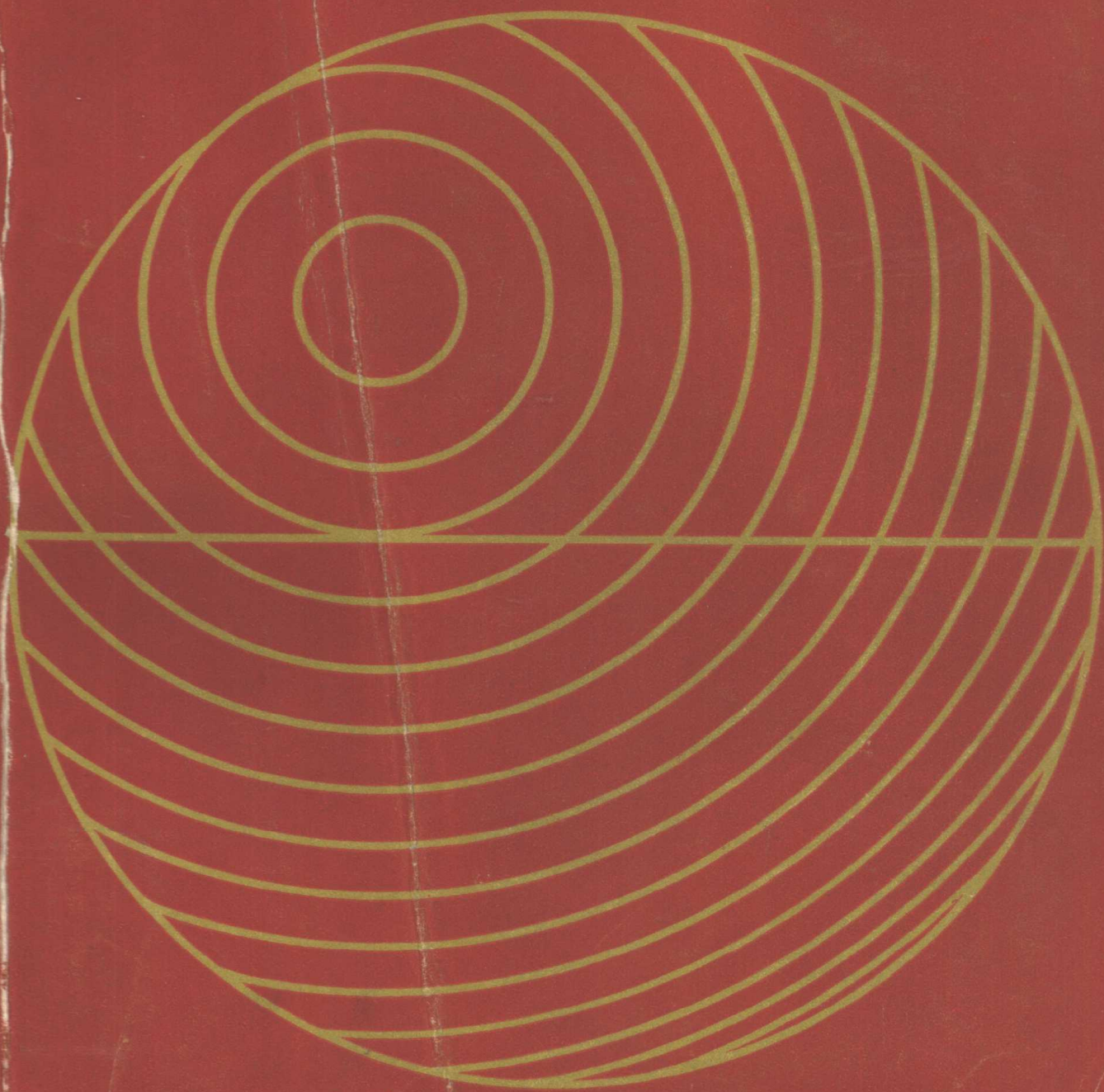


防原医学

主 编 程 天 民



上海科学技术出版社

防 原 医 学

主 编 程天民

副 主 编 罗成基 阎永堂

编 者

(以姓氏笔画为序)

王文正	林 远	罗成基
郑景熙	周善章	施 炎
赵祥萃	黄之杰	阎永堂
程天民	程绍钧	翟建才

上海科学技术出版社

责任编辑 方婷娜

防原医学

程天良 主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 祝桥新华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 31.75 字数 757,000

1986年8月第1版 1986年8月第1次印刷

印数 1—1,700

统一书号: 14119·1775 定价: 6.45元

前 言

核武器是大规模杀伤武器,可在极短时间内造成大量伤员,伤类多,伤情重,给卫勤保障带来很大困难。一旦遭受核袭击,军用、民用设施与人员同时可被破坏、伤害,只有军队和地方通力协作,才能有效地组织防护和救治。另一方面,随着我国“四化”事业的发展,核能的开发和综合利用已日益广泛而深入地渗透到工农业生产、科学技术和人民生活的多个领域,并有力地促进了经济的发展和技术的进步。因此,预防和救治核武器损伤和核事故伤害,做好利用核能的医学防护,具有重大意义,防原医学也就成为平战结合、军民两用的一门科学。

正是为适应平战、军民的需要,我们编写了这本《防原医学》。本书主要依据我国防原医学的研究成果,其中包括作者自己的工作,并有选择地吸取了国外资料,特别是日本原子弹伤害的医学资料。重视理论联系实际,注意提高核物理和损伤原理、病理基础、防治原则的理论深度,并力求详细介绍防护、救治的原则和措施。由于防原医学研究大量地需要通过动物实验来进行,因而引用了一定数量的动物实验资料,作为理论探讨和实验防治研究的参考。还重视了技术与勤务的结合,技术以勤务为指导,勤务以技术为基础,注意对不同损伤的发生情况、诊断依据和预后判定等进行群体分析;阐述诊治时,注意分级救治不同阶段的要求。全书以急性放射病和复合伤为重点,并相应地叙述其他伤害。

本书主要供医学院校、医院、科研机构和管理部门使用,主要对象为防原医学、放射生物学、放射卫生学、核医学等的专业工作者和其他教学、医疗、科研工作者,也可作为本科生、研究生的参考书。在编写过程中,得到了兄弟单位的协助和支持,至为感谢。因水平所限,书中难免有缺点、错误,竭诚欢迎批评指正。

编 者

一九八五年十月一日于

重庆第三军医大学

目 录

第一章 核辐射物理学基础

第一节 原子和原子核	1	一、 α 粒子	8
一、原子	1	二、 β 粒子	10
二、原子核	2	三、X 和 γ 辐射	12
三、核能	3	四、中子	15
第二节 放射性衰变	5	第四节 常用的几个辐射量和单位	18
一、放射性	5	一、国际单位制(SI)	18
二、放射性核素的衰变	5	二、常用的基本辐射量和单位	20
第三节 电离辐射与物质的相互作用	8	三、辐射防护使用的量和单位	25

第二章 核武器及其杀伤作用

第一节 核武器	28	二、冲击波	43
一、核武器发展简述	28	三、早期核辐射	47
二、核武器技术水平的主要标志	29	四、放射性沾染	49
三、核武器的种类和核爆炸的原理	31	第三节 核武器的杀伤作用	57
四、核爆炸的方式	35	一、核武器的杀伤范围	57
五、核爆炸的外观景象	37	二、核武器损伤的伤类伤情	60
第二节 核武器的四种杀伤因素	41	三、影响核武器杀伤作用的因素	60
一、光辐射	41		

第三章 核武器损伤的防护

第一节 关于“防护”的概念	63	第五节 工事防护	73
第二节 对四种杀伤因素可防性的分析	64	一、工事对四种杀伤破坏因素的防护特点	73
一、对光辐射可防性的分析	64	二、野战工事的防护作用	73
二、对冲击波可防性的分析	65	三、人防工事的防护作用	75
三、对早期核辐射可防性的分析	66	四、永备工事的防护作用	76
四、对放射性沾染可防性的分析	67	五、工事内人员的损伤特点	77
第三节 简易防护	68	第六节 放射性沾染的防护	77
一、利用地形地物	68	一、对放射性沾染的预测	78
二、利用就便器材和防护器材	70	二、烟云到达前的防护准备	79
三、闪光后的隐蔽动作	71	三、辐射侦察和剂量监督	79
第四节 大型兵器防护	71	四、进入、通过和停留沾染区时间的	

控制	79	六、药物防护	82
五、在沾染区内的防护措施和行动要求	80	七、放射性污染的消除	83

第四章 辐射侦察

第一节 辐射侦察的任务	88	第四节 剂量监督	96
第二节 射线探测方法	88	一、外照射剂量的监测	96
一、胶片法	89	二、沾染检查	98
二、量热法	90	第五节 战时核辐射控制量	102
三、化学法	90	一、 γ 射线全身照射的控制量	102
四、闪烁法	92	二、放射性落下灰在饮水、食物中的控制量	104
五、电离法	92	三、空气中放射性落下灰沾染浓度的控制值	104
第三节 野战射线探测仪	92	四、放射性落下灰在各种表面上沾染程度的控制值	105
一、野战射线探测仪的基本构造原理	92		
二、几种辐射探测仪简介	94		

第五章 急性放射病

第一节 核爆炸时急性放射病的发生情况	107	二、出血综合征的临床表现	161
一、早期核辐射损伤的发生地域	107	第七节 急性放射病的免疫与感染	163
二、早期核辐射损伤的发生率	109	一、免疫细胞和免疫淋巴组织对核辐射的敏感性	163
三、发生单纯急性放射病的条件	112	二、核辐射对免疫功能的影响	165
第二节 电离辐射生物学作用的几个问题	113	三、急性放射病免疫功能异常的实践意义	169
一、射线种类及生物对象	113	第八节 辐射对物质代谢的影响	175
二、影响辐射生物学作用的外部因素	114	一、核酸大分子损伤、核酸代谢障碍与DNA修复	175
三、辐射效应的基本生物学特性	121	二、蛋白质和氨基酸代谢的改变	181
第三节 辐射细胞效应	126	三、糖代谢和能量利用障碍	187
一、辐射对细胞分裂周期进程的影响	126	四、脂类代谢的改变	189
二、辐射对细胞膜的影响	127	五、水电解质及酸碱平衡失调	189
三、辐射对染色体的影响	128	第九节 急性放射病的病理变化	190
四、辐射引起的细胞死亡	131	一、细胞辐射损伤	190
第四节 放射病的发病问题	135	二、各系统的主要病理变化	192
一、概述	135	三、关于出血病变	215
二、原发作用	136	四、关于感染病变	217
三、继发作用	140	五、肠型放射病的病理变化	222
第五节 造血功能障碍	144	六、脑型放射病的病理变化	227
一、正常造血	145	第十节 急性放射病的临床特点	230
二、造血细胞的辐射损伤与恢复	149	一、伤情和剂量的关系	230
第六节 出血综合征	156	二、急性放射病的分型分度	232
一、出血综合征的发生原理	156		

三、急性放射病的临床经过·····	234	一、概述·····	265
四、不同剂量照射后对战斗力、劳动力的影响·····	238	二、放射防护剂的分类及其作用·····	266
五、人急性放射病病例·····	240	三、几种效价较高的防护剂·····	270
第十一节 急性放射病的诊断·····	245	四、防护剂抗放作用的原理·····	275
一、早期分类·····	246	五、防护剂的实际应用与今后研究方向·····	277
二、临床诊断·····	248	第十四节 中子损伤·····	281
第十二节 急性放射病的治疗·····	256	一、中子特性简介·····	281
一、治疗原则·····	256	二、中子弹·····	283
二、治疗中的几个问题·····	256	三、中子损伤的特点·····	284
第十三节 急性放射病的药物预防·····	265	四、中子损伤的防护·····	287
		五、中子损伤的预防和治疗·····	288

第六章 放射性沾染内照射损伤

第一节 内照射作用·····	292	二、主要代谢变化·····	311
一、放射性体内污染的途径·····	292	三、机体反应性改变·····	311
二、进入体内放射量的估计·····	293	四、主要临床特点·····	312
三、内照射作用的特点·····	295	五、远期效应·····	313
四、放射性物质在体内的代谢·····	297	第三节 内照射损伤的诊断和防治·····	318
五、影响放射性物质体内代谢的因素·····	302	一、内照射损伤的诊断依据·····	318
第二节 内照射损伤的效应·····	307	二、内照射损伤的预防·····	319
一、主要脏器系统的病理变化及其影响·····	307	三、内照射损伤的急救和治疗·····	319

第七章 慢性放射病

第一节 发病因素·····	331	三、实验室检查·····	336
第二节 临床表现·····	331	四、鉴别诊断·····	337
一、自觉症状·····	331	第四节 分度和处理原则·····	339
二、体征·····	332	一、I度慢性放射病及其处理原则·····	339
三、实验室检查·····	333	二、II度慢性放射病及其处理原则·····	340
第三节 诊断和鉴别诊断·····	336	第五节 预防和治疗·····	340
一、射线接触史·····	336	一、预防·····	340
二、临床表现·····	336	二、治疗·····	341

第八章 小剂量外照射对机体的影响

第一节 小剂量外照射的概念及其作用特点·····	344	二、放射性沾染外照射所致小剂量照射人员将多于急性放射病病人·····	347
一、小剂量外照射的概念·····	344	三、核爆炸时可发生单纯小剂量照射和以烧伤、冲击伤为主的复合小剂量照射·····	347
二、小剂量外照射作用的特点·····	344	第三节 小剂量外照射对机体的影响·····	349
第二节 核战争中发生小剂量外照射作用的可能性·····	346	一、早期自觉症状·····	349
一、早期核辐射小剂量照射人员将多于急性放射损伤伤员·····	346		

二、血液学变化·····	350	四、机体其他功能、代谢改变·····	353
三、染色体畸变·····	352		

第九章 核辐射对机体的远期效应和遗传效应

第一节 核辐射对机体的远期效应·····	356	第二节 辐射致癌效应·····	362
一、血液和造血器官的变化·····	356	一、不同性质辐射的致癌效应·····	363
二、眼晶体混浊(白内障)·····	357	二、辐射所致肿瘤的类型·····	364
三、对生殖腺和生育力的影响·····	359	三、辐射致癌的机制·····	364
四、对胚胎、胎儿和少年儿童生长、发育的影响·····	360	四、与辐射有关的几种主要癌症·····	366
五、对衰老和寿命的影响·····	361	第三节 辐射遗传效应·····	369
		一、染色体畸变·····	369
		二、基因突变(点突变)·····	371

第十章 皮肤放射损伤

第一节 概述·····	374	第三节 临床表现·····	381
一、皮肤放射损伤的发生·····	374	一、皮肤放射损伤的临床经过·····	381
二、皮肤放射损伤的分类·····	374	二、落下灰所致皮肤损伤的病程特点·····	385
三、影响皮肤放射损伤的因素·····	376	第四节 诊断·····	386
第二节 病理变化·····	380	第五节 急救和治疗·····	386
一、急性皮肤放射损伤的病理变化·····	380	一、救治原则·····	386
二、慢性皮肤放射损伤的病理变化·····	380	二、具体治疗措施·····	387

第十一章 核爆炸烧伤

第一节 烧伤发生情况·····	391	第三节 呼吸道烧伤·····	409
一、烧伤的发生地域·····	391	一、发生条件·····	409
二、光辐射烧伤的发生率·····	392	二、病理变化和致伤原理·····	410
三、烧伤的类型·····	393	三、临床表现和诊断·····	411
第二节 光辐射皮肤烧伤·····	394	四、预防和治疗·····	413
一、伤情特点·····	394	第四节 眼烧伤和闪光盲·····	413
二、深度分度·····	397	一、角膜烧伤·····	414
三、临床过程·····	400	二、眼底视网膜烧伤·····	415
四、临床诊断·····	404	三、闪光盲·····	417
五、急救与治疗·····	406		

第十二章 核爆炸冲击伤

第一节 致伤原理·····	419	三、冲击伤的伤情·····	428
一、冲击波的致伤原理·····	419	第三节 几种常见的冲击伤·····	429
二、决定和影响冲击波致伤作用的因素·····	421	一、听器冲击伤·····	429
第二节 发生情况·····	424	二、肺脏冲击伤·····	430
一、冲击波的杀伤范围·····	424	三、心脏冲击伤·····	432
二、冲击伤的伤类·····	427	四、腹部冲击伤·····	433

五、颅脑冲击伤·····	435	第 四 节 诊断和救治·····	437
六、四肢和脊柱冲击伤·····	436	一、临床诊断·····	437
七、其他损伤·····	436	二、急救与治疗·····	441

第十三章 核爆炸复合伤

第 一 节 复合伤的发生情况·····	446	二、主要临床表现及其病理基础·····	471
一、复合伤的发生地域和比例·····	446	三、主要死亡原因分析·····	479
二、复合伤的类型·····	449	第 四 节 复合伤的诊断·····	481
三、复合伤的伤情分度·····	453	一、对伤类伤情的群体判断·····	481
第 二 节 放射复合伤·····	453	二、在杀伤区的初步判断·····	482
一、放射损伤与其他伤害的复合效应·····	453	三、在早期救治机构的早期分类和诊断·····	482
二、以放射损伤为主的放射复合伤·····	457	四、在医院的确切诊断·····	483
三、以烧伤为主的放射复合伤·····	468	第 五 节 复合伤的急救与治疗·····	486
四、以冲击伤为主的放射复合伤·····	469	一、对复合伤的基本救治原则·····	486
第 三 节 烧冲复合伤·····	470	二、杀伤区和早期救治机构的救治·····	487
一、实际伤情·····	470	三、后方医院治疗·····	488

第一章 核辐射物理学基础

第一节 原子和原子核

原子是构成物质的基础，是用任何化学方法都不能再分的最小单元。原子是由原子核和核外电子所组成。原子核和电子都是具有质量、电荷和磁矩的微观粒子。它们均处于不断的运动状态之中。

一、原子

(一) 原子结构简介

原子的体积和质量都是十分微小的，直径只有 10^{-10}m 左右。如果把 1 亿个氧原子排成一行，它们的长度不过 1cm 多。一个氢原子的静止质量是 $1.6734 \times 10^{-27}\text{kg}$ ，较重的铀原子也只有 $3.951 \times 10^{-25}\text{kg}$ 。

原子是由带正电的原子核和绕核高速运动带负电的电子所组成。在正常情况下，由于原子核所带的正电量与核外电子所带的负电量相等，因此，就整个原子来说，它是呈电中性的。原子核比原子小得多，原子核的半径约为原子半径的万分之一，原子核的体积只占原子体积的几千亿分之一。假设原子有一座十层大楼那样大，而原子核却只有一个樱桃那样大。因此，相对来说，原子里有一个很大的空间，核外电子在这个空间里作高速的运动。

核外电子的质量比核的质量要轻得多。1 个电子的静止质量是 $9.1091 \times 10^{-31}\text{kg}$ ，与最轻的氢原子核的质量相比，仅为后者的 $1/1836$ 。较重的铀原子的 92 个核外电子的总质量，仅为其核的质量的 $1/4714$ 。原子质量越大，这个比值越小。

(二) 核外电子

电子所带负电荷的量值 $e = 1.6021 \times 10^{-19}\text{C}$ (库仑, coulomb)。束缚于原子内的电子在核外作高速运动，它们相对于核的位置只能用出现的几率来认识，只能指出它在核外空间某处出现机会的多少。在核外的某些地方出现的机会多，而在另一些地方出现的机会就少，人们形象地把它称之为“电子云”。对氢原子来说，它核外只有 1 个电子，其运动对核是球形对称的。

在含有多个电子的原子中，核外各个电子都处于各自的一定能量状态中，能量愈大的电子离核的平均距离愈远。通常按原子中各电子动能的大小把其分布在不同距离的几个“壳层”中。把能量最低、离核最近的叫第 1 层，能量稍高、离核稍远的叫第 2 层，由里往外依次类推，叫 3、4、5、6、7 层，或依次叫 K、L、M、N、O、P、Q 层。这样，就可以把核外电子看作是在不同能级(energy level)的电子壳层上运动着的。在正常情况下，原子中的电子总是尽先占据能量较低的能级。当核外电子都占在尽可能低的能量位置时的状态，称为基态(ground state)，处于基态的原子最为稳定。当基态原子中有的电子由于受到某种作用而获得额外的能量时，可从原来的状态过渡到能量较高的状态。这种能量较高的状态称为激发态

(excited state)。处于激发态的原子是不稳定的，还会通过某种方式放出能量而回复到基态，这种现象即所谓跃迁(transition)。

核外电子的分布是有一定规律的。

第一，各电子壳层容纳最多的电子数目是 $2n^2$ 个。即：K 层($n=1$)为 $2 \times 1^2 = 2$ 个；L 层($n=2$)为 $2 \times 2^2 = 8$ 个；M 层($n=3$)为 $2 \times 3^2 = 18$ 个，……。

第二，最外层的电子数目不超过 8 个(K 层为最外层时不超过 2 个)。

第三，核外电子总是尽先排布在能量最低的电子壳层里，然后再由里往外，依次排布在能量逐步升高的电子壳层里。

根据核电荷数和电子壳层的排布，将原子结构示意图如图 1-1，图中符号“ $\cdot$ ”表示原子核，“+11”表示原子核内有 11 个正电荷，弧线表示电子壳层，弧线上的数字表示该壳层的电子数。

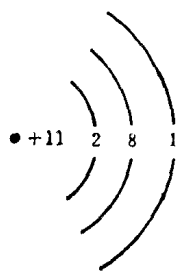


图1-1 钠原子结构示意图

(三) 原子质量单位

各元素的原子质量是不相同的。如：一个碳原子的静止质量是 $1.993 \times 10^{-26} \text{kg}$ ，一个氧原子的静止质量是 $2.657 \times 10^{-26} \text{kg}$ 。

由于原子的质量很小，为应用方便起见，国际标准化组织(ISO)于 1968 年提出了衡量原子质量的国际标准，确定了(统一的)原子质量单位[(unified) atomic mass unit]。它的定义是：一个(统一的)原子质量单位，等于一个碳原子(其核是由 6 个质子和 6 个中子所组成)质量的 $1/12$ ，以符号 u 表示。

$$1u = 1.6604 \times 10^{-27} \text{kg}$$

以此作为量度原子质量的单位。其他原子的质量与原子质量单位(u)的比值，分别称为各元素的相对原子质量，或叫原子量(atomic weight)。

二、原子核

原子核是由质子和中子所组成，因此，通常又把质子和中子统称为核子。质子相当于氢原子的原子核，其静止质量为 $1.007277u$ ，它带一个单位的正电荷($1.6021 \times 10^{-19} \text{C}$)。中子是一种不带电的中性粒子，其质量和质子接近相等，它的静止质量等于 $1.008655u$ 。单独存在时是不稳定的，它们减少一半所需的时间约为 13 分钟。

原子核的密度是十分巨大的。假定把核子紧挨着排满 1cm^3 ，那么它们的重量约有 100Mt (1 亿吨)。

在一个稳定的原子核里，中子和质子的相对数目是有一定比例的。一般说来，在相对原子质量轻的原子核中，中子数与质子数的比值大致是 1 或稍大一些(^1H 和 ^3H 是例外)；在较重的原子核中，中子数与质子数之比要大于 1；重原子核的这个比值可达 1.5 以上。

一种元素区别于另一种元素的重要标志，是它的核电荷数，也就是它核内的质子数。凡核内具有特定质子数的一类原子，也就表现为某一确定的元素。通常把核内的质子数，称为原子序数(atomic number)，用 Z 表示。原子序数即代表在元素周期表中各元素排列顺序的数值。元素氢的原子核内只有 1 个质子，其原子序数为 1；氦的原子核内有 2 个质子，其原子序数为 2；钴的原子序数为 27；铀的原子序数为 92。

核素(nuclide)是在其核内具有特定数目的中子和质子的一种原子。用符号 ^A_ZX 表示。其中 X 是表示核素的符号； Z 为该核素的原子序数； A 为该核素的核子数(或叫质量数)，它

等于其核内的质子和中子的总数。核内的中子数(N)等于 $A - Z$ 。例如: $^{131}_{53}\text{I}$, 表示核素碘的一个原子核具有 131 个核子, 其中有 53 个质子, 而中子数为 $131 - 53 = 78$ 个。在这个符号中的质子数也可略去不写, 通常写成 ^{131}I 。因为 I 或其他确定的元素, 其质子数(或原子序数)是已知的。

在一种元素的原子核内, 其质子数总是相等的, 但是它们的中子数可以不同(即质量数不同)。对氢原子来说, ^1_1H 的核只有 1 个质子; ^2_1H (氘)的核由 1 个质子和 1 个中子组成; ^3_1H (氚)的核由 1 个质子和 2 个中子组成。氢、氘、氚的原子序数是相同的, 而其质量数却各不相同, 它们在元素周期表上占有同一位置。这种原子序数相同而质量数不同的核素称为同位素。一种元素可以包括几种同位素。

在原子核内, 每个质子都带有 1 个正的基本电荷(elementary charge)。而它们之间的距离又是非常的小(约 10^{-13}cm 数量级), 显然它们之间的静电排斥力是很大的, 但它们却又紧密地聚合在一起。经研究发现, 在核内各核子之间尚存在着一种很强的相互引力, 叫做核子力(nuclear force)。诸核子只有在聚合得非常紧密的情况下, 才能呈现出强大的核子力。当核子之间的距离小于 $3 \times 10^{-13}\text{cm}$ 时, 它们之间的核子力才能远远超过静电排斥力, 这样才能使原子核保持稳定; 当核子之间的距离大于 $3 \times 10^{-13}\text{cm}$ 时, 它们之间的核子力就迅速地减少到可以忽略的地步。原子核内的 1 个核子, 只可能与它周围的几个核子保持核子力的作用。影响原子核稳定性的因素很复杂, 因为对于维持一个相对稳定的原子核的核力, 其详细性质至今尚未完全认识清楚。原子核的平均结合能是原子核稳定性的一个指标, 下面将要谈到。

三、核能

核能(energy of nucleus)即为一般所称的原子能。实际上核能这个名称是确切的, 因为它是由原子核结构发生改变时放出的能量。物质所具有的核能要比化学能大几百万倍甚至千万倍以上。这是由于核子之间的相互作用比电子与原子核以及电子之间的相互作用大得多的缘故。

(一) 质量与能量的关系

质量和能量是物质同时具有的两种属性。如果一个体系的能量发生了改变, 这就意味着体系的质量随着发生了相应的改变, 反之亦然。它们之间是相互联系着的。对静止的物体来说, 质量与能量之间的相互联系关系式为:

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (\text{公式 1})$$

式中 E_0 是与物体相对应的静止质量能(rest mass energy); m_0 为该静止物体的质量; c 为光在真空中的速度($3 \times 10^8 \text{m/s}$)。上式指出, 凡具有 $m_0 g$ 静止质量的物体, 就可以具有 $m_0 c^2$ 数值的静止质量能。若该物体是以极高的速度 v 运动着, 那么其质量的增量是不能忽略的。根据狭义相对论, 其质量应为:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (\text{公式 2})$$

则公式 1 可写为:

$$E = m_0 c^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (\text{公式 3})$$

1g 物质的静止质量能为:

$$1 \times (3 \times 10^{10})^2 = 9 \times 10^{20} \text{erg (尔格)} = 9 \times 10^{13} \text{J (焦耳)}$$

这相当于 2.7kt 煤完全燃烧时所放出的化学能。

(二) 质量亏损与结合能

原子是由质子、中子和电子所组成。但原子的质量却小于组成该原子的各个粒子质量的总和。如氦(${}^4_2\text{He}$)原子,其质量为 4.003873u,它是由 2 个质子、2 个中子和两个电子所组成。它们之间的质量差为:

$$4.003873\text{u} - 2.017964\text{u} - 2.015186\text{u} - 0.001098\text{u} = -0.030375\text{u}.$$

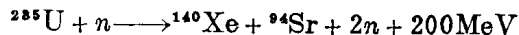
经研究发现,这种质量减少的事实,对所有核素的原子,都是普遍存在的。这个减少量通常叫做质量亏损(mass defect)。

我们知道,任何两个相互吸引的物体之间都有势能(potential energy)存在,当它们彼此靠近的时候,就要放出一定数量的能量。由于原子核内各核子之间存在着很强的相互吸引的核子力,所以,由若干个自由状态的单个核子相互靠近而结合成原子核时,也要释放出相应的能量。这种能量叫做结合能(binding energy)。在这个过程中,平均每个核子所释放出的结合能,叫做平均结合能。当核子结合成为不同核素的原子核时,它们的平均结合能是各不相同的。对平均结合能较大的原子核,就结合得紧密,核也较稳定。所以原子核的平均结合能的大小,可以看作是原子核稳定程度的一个标志。当从平均结合能较小的核转变成平均结合能较大的原子核时,就有相应数量的能量被释放出来,这就是通常所说的原子能或叫核能。

核子结合成原子核时的质量亏损,与同一过程中所释放出的结合能是密切相关的。根据质能相互联系关系式,亏损了的质量转化为释放出来的结合能。

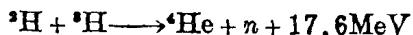
实践证明,对质量数小的轻核(原子序数低)与质量数较大的重核(原子序数大)来说,核子的平均结合能均较小;但对中等质量数的原子核来说,它们的平均结合能都比较大。这就显示出,把重核分裂成为 2 个中等质量数的原子核,称为核裂变;或者把很轻的 2 个原子核聚合成为稍重的原子核,称为核聚变。这两个过程都可能从原子核内释放出大量的能量。

核裂变和核聚变均与核衰变(将在第二节中讨论)不同。它们的这些反应,只有当原子核受到外来某些特定因素的作用时才能发生。如 ${}^{235}\text{U}$ 的原子核用热中子轰击时,当铀原子核在俘获一个中子后,将分裂成原子质量数在 70 至 160 之间的 2 个碎片(即中等质量数的核素),同时放出 2 到 3 个快中子,并释放出一定量的结合能。每 1 个 ${}^{235}\text{U}$ 核发生裂变时释放出来的能量,一般都在 200MeV 左右。其反应式如下:



可以看出,1 个 ${}^{235}\text{U}$ 的核发生裂变时释放出来的能量值是可观的。同时它的下代中子(2 到 3 个)经慢化后,又可能引起其他 ${}^{235}\text{U}$ 核发生裂变,释放出更多的能量,再产生更多的中子;这样的裂变一经开始就有可能自动地连续进行下去,在这个瞬间将伴随着放出巨大的能量。这种裂变自动持续进行下去的反应过程叫做链式反应。1kg ${}^{235}\text{U}$ 完全裂变所放出的能量为 $8.03 \times 10^{13}\text{J}$,相当于 2.4kt 煤完全燃烧所放出的热能。

另一种获得核能的反应是由两个轻的原子核聚合成一个稍重的核。由于 ${}^4\text{He}$ 的平均结合能,比原子序数邻近的其他原子核大的多。所以当轻原子核之间发生聚变产生 ${}^4\text{He}$ 时,就会放出较大的结合能。如氘(${}^2_1\text{H}$)与氚(${}^3_1\text{H}$)相聚合后产生氦(${}^4_2\text{He}$)和 1 个中子,并释放出一定量的能量。这样的反应过程称为聚变反应。其反应式为:



要使轻原子核的聚变成为可能,就需要把参加反应的物质加热到数千万度,甚至达到亿度以上。只有这样,才能使这些原子核获得很大的动能,并以很高的速度运动着,在它们之间相互进行着剧烈的碰撞,这样就会发生聚变反应,同时放出巨大的能量。如氘和氚通过聚变生成 1kg 的氦时,释放出来的能量相当于 12kt 煤完全燃烧时所释放出来的能量。这相当于同样数量的 ^{235}U 完全裂变所放出能量的 5 倍左右。同时参予聚变反应的轻元素,可以不受限制地增加到任意多的数量。因此,不可控聚变反应可以获得极其巨大的爆炸能量。由于这种核反应是在极高的温度下进行的,故一般叫做热核聚变反应。当这种反应进行时的温度越高,则反应进行的也越快,反应的程度也越充分。实验证明,反应的充分程度和速度,大致是与温度成正比的。

第二节 放射性衰变

一、放射性

和原子相类似,原子核也是处于一定的能量状态中。处于基态的原子核最为稳定。处于较高能级状态的原子核称为受激核(excited nucleus)。这些激发态的原子核是不稳定的,它们可以通过某种方式自发地放出能量而回复到基态。

核辐射是原子核内部变化的结果,基本上不受核外电子运动状态的影响。在原子核内部发生的变化包括核衰变、核裂变和核聚变三类。核聚变是轻原子核由外界获得极高能量后相互作用的结果。核裂变有自发和感生两种,前者是重核不稳定性的一种表现,如 ^{238}U 的自发裂变;后者系指原子核在受到外来粒子作用时立即发生的裂变,如 ^{235}U 在受到热中子轰击时的裂变。核衰变是不稳定原子核自发地放出射线而不断减少的过程。这种不稳定原子核自发地放出射线的现象叫放射性,凡具有放射性的核素就叫做放射性核素。

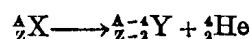
自然界存在的各种核素中,原子序数在 84 以后的都有放射性。当然,这些都是属于天然放射性核素的一部分。1934 年约里奥-居里夫妇首先用人工方法制造出放射性核素。在这之后,人们开始应用加速器加速各种粒子,以轰击不同物质的靶原子,用来产生各种放射性核素。1942 年以后建成了核反应堆,就获得了很强的中子源,为大量地生产各种人造放射性核素,提供了很好的工具。目前几乎所有的元素都有放射性同位素,它的品种已近 2,000 种。

二、放射性核素的衰变

表征放射性核素衰变特征的有:(1)衰变的类型;(2)辐射的能量;(3)衰变的快慢。任何一种放射性核素的衰变,都要同时具有这些物理因素。

(一) 辐射的类型和能量

1. α 衰变:是指放射性核素在衰变时从核内发射出 α 粒子(即氦原子核 ^4He)。由于它具有 2 个质子和 2 个中子,并带有 2 个正电荷,所以放射性核素在 α 衰变之后,它的质量数减少 4,原子序数减少 2。因此,在 α 衰变前后,核素变化的表达式为:

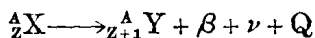


式中 ${}_Z-2^{A-4}Y$ 是衰变后的新核素。

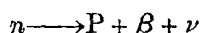
例如: ${}_{88}^{226}\text{Ra} \longrightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$

由一种放射性核素在衰变时放射出一组 α 粒子的能量是单一的。某些放射性核素，可以发射一组以上而能量各异的 α 粒子，同时还伴有 γ 辐射。如 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 在衰变时，发射能量为 4.777 和 4.589 MeV 的两组 α 粒子，同时还发射出能量为 0.188 MeV 的 γ 辐射。

2. β 衰变：放射性核素从核内发射出 β 粒子的过程叫 β 衰变。事实上它就是从核内发射出来的高速电子，只是为了区别起见，通常把从核里发射出来的电子称为 β 粒子（包括正 β 粒子或负 β 粒子）。由于 β 粒子的质量比核的质量要小得多，相对说来，可以把 β 衰变前后的原子质量数看作相等。而 β 粒子带一个基本电荷，所以衰变后新核素原子序数的增量为 1。显然在负 β 衰变的情况下，其表达式可写为：



式中 $^A_{Z+1}\text{Y}$ 为 β 衰变后的新核素， ν 为中微子，它是质量只有电子质量万分之五的中性粒子， Q 是衰变过程中所放出的能量。这种衰变可以看成是放射性原子核中有 1 个中子转变成质子的过程。即：



实验指出，由一种放射性核素在衰变时放出的 β 粒子的能量 (E_β) 是一个连续的能谱（图 1-2）。 E_β 的量值可以从零到最大值为 $E_\beta = Q$ 。 $E_\beta = Q/3$ 的 β 粒子数最多，这个能量大约是所有这些粒子的平均能量。而接近最小、最大两端能量的 β 粒子数则最少。一般书刊上所标称的 β 粒子的能量，都是指 β 粒子的最大能量。

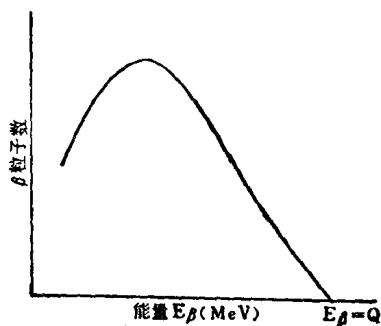


图1-2 β 粒子的能谱

有些进行 β 衰变的核素，仅发射一组 β 粒子，如 $^{14}_6\text{C}$ 、 $^{32}_{15}\text{P}$ 等。也有一些在 β 衰变的同时又发射 γ 射线，如 $^{60}_{27}\text{Co}$ 在衰变时，除发射出 β 粒子（最大能量为 0.306 MeV）外，还伴随着发射出能量为 1.17 和 1.33 MeV 的两组 γ 射线。有的放射性核素在衰变时，可以发射出两组以上的 β 粒子。

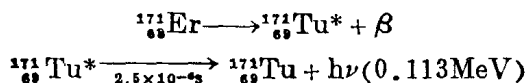
在进行 β 衰变的核素中，有某些核素的母核 ^A_ZX 可以通过电子俘获（electron capture）的方式衰变成为子核 $^A_{Z-1}\text{X}$ 。所谓电子俘获是指核从电子壳层中俘获 1 个电子而使核里的一个质子转变成中子和中微子的过程。即：



如果俘获的电子来自 K 壳层，则称为 K 俘获；俘获来自 L 壳层，则称为 L 俘获，等等。通常 K 俘获最为普遍。电子俘获过程与中微子、标识辐射（将在第三节内讨论）的发射是伴生的，有的也伴有 γ 辐射。

3. γ 衰变： γ 射线是从原子核内发射出来的电磁辐射。实际上它就是光子（photon），无静止质量，在真空中的传播速度为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，其能量与波长成反比。相对说来，它的波长较短（ $10^{-10} \sim 10^{-13} \text{ m}$ ）。 γ 射线通常是由核衰变时伴随着 α 辐射、 β 辐射或其他辐射一起发生的。它是从原子核的激发能级（激发态）自发跃迁至较低的能级（基态）时的产物。

若干发射 β 粒子（或其他粒子）的核，当它们放出这些粒子后仍处于一种受激状态。这种激发态的存在时间非常短（一般是 10^{-13} s ），可以说在瞬间即跃迁至基态而放出 γ 射线来，以致很难把 β 和 γ 这两个阶段的衰变分开而测出它们各自的衰变半衰期。但有些核素的衰变在其子体激发能级停留的时间比较长，因而能够把 γ 衰变的半衰期测量出来。如：



${}^{171}_{88}\text{Tu}^*$ 是 ${}^{171}_{88}\text{Tu}$ 的同质异能素(isomer)。它们之间的能级跃迁叫做同质异能跃迁。应该指出,放射 γ 射线并不是同质异能素的唯一衰变方式,还有放射 β 、 β^+ 粒子和电子俘获等衰变方式。

一种放射性核素,在进行 γ 衰变所发射出一组 γ 射线的能量是单色的。此能量的大小,大致等于核跃迁前后的两个能级之差。有些放射性核素,可以有两组或两组以上能量不同的 γ 射线存在。

放射 γ 射线的核衰变还可以以发射“内转换电子”(conversion electron)的方式从激发能级回到较低的能级但不放出 γ 射线。所谓内转换电子,就是指向外发射核外某壳层的电子,主要是 K 电子。内转换电子的能量是单一的。放射内转换电子和 γ 射线是核从激发能级(激发态)跃迁至较低的能级(基态)的两种可能方式。内转换过程所占的份额因不同放射性核素而异。

(二) 衰变的规律

具有一定量的某种放射性核素,由于衰变的结果,其放射性原子数随时间的流逝而逐渐减少。设在初始时间 t_0 时的放射性原子数为 N_0 , 在其后任一时刻 t 所存在的放射性原子数为 N , 则在时间间隔 $t_0 - t = \Delta t$ 内,衰变的原子核数为 $N_0 - N = \Delta N$ 。实验证明,衰变率 $\Delta N / \Delta t$ 正比于现存的放射性原子数 N , 引入比例常数 λ , 则

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

式中 λ 称为衰变常数(decay constant)。负号表示衰变随着时间的增加而减少。它的单位是: s^{-1} , h^{-1} , d^{-1} 等。对上式中的增量取极限值并积分,就可得到:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{公式 4})$$

这就是计算放射性核素衰变的指数定律,它在一切形式的放射性衰变中都能成立。

衰变常数可表示为

$$\lambda = -\frac{\Delta N / \Delta t}{N}$$

即 λ 表示每秒衰变的核数为原有放射性核数的几分之几。每一种放射性核素,其 λ 都具有一定的数值。例如, ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ 的 λ 为 $1.38 \times 10^{-11}\text{s}^{-1}$ 、 ${}^{32}_{15}\text{P}$ 的 λ 为 $0.56 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 。这说明每秒钟内有 10^{11} 分之 1.38 的 Ra 原子衰变和 10^6 分之 0.56 的磷原子衰变。 λ 的数值可以表明各种相应的放射性核素的相对衰变速度。

放射性核素的衰变规律,不受外界一般物理条件(如温度、压力)或原子的化学结合状态的影响。能够促使原子核发生变化的能量,要比化学或一般物理过程中所需的能量要高得多。

与衰变常数 λ 有着线性相关的,并经常用来表示放射性核素特征的另一个量是半衰期。它是指放射性核素的数量衰减到其初始量的一半所经过的时间。用 $T_{1/2}$ 表示,代入公式 4:

$$N/N_0 = 1/2 = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

取对数得:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (\text{公式 5})$$

从式中可看出半衰期与衰变常数成反比。

各种放射性核素的半衰期可以差别很大。如 ^{238}U 的半衰期为 4.5×10^9 年; ^{60}Co 的半衰期为 5.26 年; ^{32}P 的半衰期为 14.3 天; 有些同质异能核素, 如 $^{135}\text{Cs}^*$ 的半衰期仅为 $2.8 \times 10^{-10}\text{s}$ 。

在实际应用时, 对于某一定数量的放射性核素, 常常需要知道的是在单位时间内有多少核发生衰变。因之提出了放射性核素的活度(activity)这个辐射量。它的定义如下:

在某时刻处于某个特定能态的一定量放射性核素的活度 A 定义为 dN 除以 dt 所得的商, 其中 dN 是在时间间隔 dt 内由那个能态发生自发核跃迁次数的期望值。即:

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (\text{公式 6})$$

单位: s^{-1}

活度单位的专名是贝可勒尔(Becquerel), 简称“贝可”, 以符号“Bq”记之。 $1\text{Bq} = 1\text{s}^{-1}$

活度的专用单位居里(Ci)暂时还可使用。

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{s}^{-1}$$

某放射性核素每秒内进行的放射性衰变数愈多, 其放射性活度也愈强。根据放射性衰变规律, 放射性活度与放射性原子数成正比, 即随物质数量的增多而加大。如以 A 代表放射性活度, 则 $A = \lambda N$ 。因此, 放射性核素当其衰变常数愈大, 及所含的放射性原子愈多时, 则该核素的放射性活度也愈强。

一定量的放射性核素的活度 A , 随着时间的推移而变化着, 也是符合指数衰减规律的。

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{公式 7})$$

式中 A_0 为放射性核素的初始活度, t 为测定初始活度后所经过的时间。

第三节 电离辐射与物质的相互作用

电离是从母体原子或分子中释放一个或几个电子的过程。

电离辐射也叫致电离辐射。它是由带电粒子(如正电子、负电子、质子或其他重离子)、不带电粒子(如中子)和电磁辐射(光子)所组成。它们可以通过初级或次级过程引起电离。本书所提及的“电离辐射”, 均是指上述那些类型的并在放射生物学、放射医学领域中经常所用能量范围内的这些辐射。

下文中常提到的“相互作用”一词, 系指能使入射粒子的能量和(或)方向发生改变的过程。

从核武器的辐射损伤与防护的角度出发, 对 α 粒子、 β 粒子、 γ 辐射和中子这四种主要类型的电离辐射与物质的相互作用及其能量传递过程应当有所了解, 分别介绍如下。

一、 α 粒子

α 粒子是氦核(^4He)。对于某些放射性核素, 可以发射一组或几组的 α 粒子, 每一组都具有大约相同的能量, 并具有其固有的半衰期。 α 粒子在通过介质时具有以下一些性质:

1. α 发射体所发射出的一组 α 粒子, 其中的绝大多数在一定的气体中具有接近相同的射程。这说明一组 α 粒子都具有大约相同的能量。